

세라믹 복합체의 방전가공 특성 (Characteristics of Electrical Discharge Machining of Ceramic Composites)

우 정운(경남대 대학원), 왕 덕현(경남대 기계공학부)

윤 존도(경남대 무기재료공학과), 안 영철(경남대 화학공학과)

J. Y. Woo (Graduate School, Kyungnam Univ.), D. H. Wang, J. D. Yun and Y. C. Ahn (Kyungnam Univ.)

ABSTRACT

Die sinking Electrical Discharge Machining(EDM) of TiC/Al₂O₃ Ceramic Matrix Composite(CMC) was conducted for positive and negative polarity according to the change of current and Duty Factor(DF). Also FEM analysis about temperature distribution of workpiece by one spark was executed. Maximum surface roughness(R_{max}) and SEM photographs of the EDMed surface for different conditions were evaluated. Higher Material Removal Rate(MRR) was obtained for negative polarity than positive one. Better surface morphology was found as the current is decreased, but the MRR was also decreased. From the SEM photographs, the size of melt cavity due to one spark is about 100 to 150 μ m in diameter.

Key Words : EDM(방전가공), CMC(세라믹 복합체), DF(듀티팩터), R_{max} (최대표면거칠기), MRR (공작물제거량), Negative polarity(역극성), SEM(전자현미경), FEM(유한요소법)

1. 서 론

기존의 구조용 재료로는 기능성의 한계에 부딪혀 선진국에서는 첨단 신소재 개발에 집중 투자하여 우수한 고온강도, 높은 탄성계수, 내식성, 내마멸성 등의 성질을 가진 복합재료가 실용화 단계에 있다. 한편 세라믹 복합체는 미국, 일본, 및 유럽 등 선진국에서 자동차 및 항공기의 필수 부품으로 실용화되고 있고, 국내에서는 학계 및 연구소를 중심으로 연구가 진행되고 있으나, 산업 전 분야에 실용화되기에는 어려움이 많아 새로운 가공기술을 필요로 한다.

세라믹 복합체는 선삭, 밀링 등의 가공방식으로는 고정밀도와 복잡한 형태의 가공이 어려운 실정이며, 특수가공방식인 레이저가공, 초음파가공, 방전가공 등이 가능성이 있는 가공방식이며, 그중 방전가공은 전기전도성이 있는 재료만 가공이 가능하며 또한 복잡한 형상가공을 하는데 가장 적합한 방법이다[1].

세라믹 복합체에 관한 연구로 Petrofes[2]는 방전가공후 가공성 평가로 표면거칠기를 측정하였는데,

가공속도가 증가할수록 크레이터의 체적이 크고 표면거칠기는 나빠진다는 것을 알았다. Ramulu[3,4] 등은 가공속도가 빠른 조건에서 표면에 미세한 파손이 일어난다고 하였으며, abrasive waterjet가공과 방전가공 방법으로 세라믹 복합체인 TiB₂/SiC의 가공성의 특성 연구를 시도하였다. Mohri[5]는 탄소강, 알루미늄을 피삭재로, 구리, 알루미늄, 텅스텐 카바이드, 티타늄 등을 소결시킨 복합재료 전극봉을 이용한 방전가공에 의한 피삭재 표면변형에 대해 연구하였으며, 작은 크랙, 높은 부식저항과 마멸저항을 확인하였다. 방전가공에 대한 Madhu[6]등은 열전도 이론을 이용하여 방전시간에 따른 용융층 깊이와의 관계를 연구하였다.

본 연구에서는 도전성이 있는 세라믹 복합체인 TiC/Al₂O₃에 대하여 가공조건을 변화시키면서 방전가공을 실행하여 공작물제거량과 최대표면거칠기들의 특성을 파악하고, 전자현미경에 의한 미세구조 변화를 평가하고자 한다. 또한 유한요소법에 의한 세라믹 복합체의 단일방전시 온도분포 해석을 하여 그 특성을 규명하고자 한다.

2. 방전가공의 원리 및 이론

방전가공(EDM)은 전극봉(Electrode)과 피삭재 사이에 스파크방전을 발생시켜 그 열로 국부적으로 피삭재를 가공하는 방법이며, 방전되는 한 주기 동안 코로나방전에서 시작되어 불꽃방전, 아아크방전 형성하여 절연파괴를 수반하고 이러한 과정이 연속적으로 발생한다.

전극봉의 극성을 음극에서 양극으로도 변경할 수 있는데 음극인 경우가 정극성이고 그 반대인 경우가 역극성이다. Fig. 1은 역극성인 경우 방전가공 현상을 나타낸 것으로 방전에 의하여 플라즈마가 형성돼 피삭재의 용융을 유발시키며 또한 방전유속에 있는 양이온과 전자가 전리되어 전극봉과 피삭재의 표면으로 이동한다.

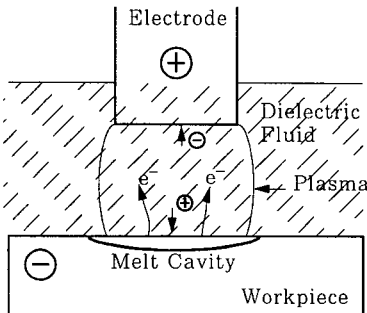


Fig. 1 EDM process for negative polarity

방전에 의하여 발생하는 분화구 모양의 용융층 크기는 방전에너지와 관련이 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} V I t \quad (1)$$

이때, 가장 큰 영향을 주는 인자는 전류와 방전시간이고, 실제 방전이 진행되는 시간 동안 유도시간, 방전시간 및 휴지시간이 존재하며 이들의 관계를 듀티팩터(Duty factor, DF)로 정의한다.

$$\text{듀티팩터}(DF) = \frac{\tau_{on}}{\tau_w + \tau_{on} + \tau_{off}} \quad (2)$$

여기서 τ_w : 방전유도시간

τ_{on} : 방전시간

τ_{off} : 휴지시간

Fig. 2(a)는 한 개의 방전이 작용하는 경우 열적모델을 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 유한요소법으로 해석하기 위한 요소들을 나타낸 것이다.

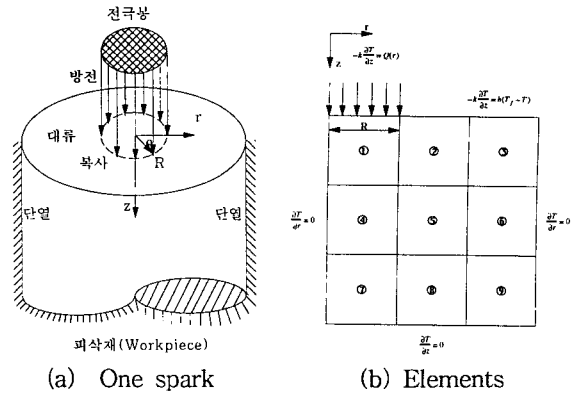


Fig. 2. FEM Model

단일 방전이 세라믹복합체에 작용할 때 다음과 같은 열방정식과 초기조건 및 경계조건을 이용하여, 유한요소법으로 정상상태에서 해석하였다.

열방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

$$\text{where, } \alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

초기조건

$$\text{At } t = 0 : T = T_0 \quad (4)$$

경계조건

$$\text{At } r = \infty : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 ; \quad \text{At } z = \infty : \frac{\partial T}{\partial z} = 0 ;$$

$$\text{At } r = 0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 ; \quad (5)$$

$$\text{At } z = 0, 0 \leq r \leq R : -k \frac{\partial T}{\partial z} = Q(r) ;$$

$$\text{At } z = 0, R \leq r \leq \infty : -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_f - T)$$

3. 실험방법 및 실험장치

본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 것처럼 헤드부분, 전극봉홀더, 작업턱크, 베드 및 조절판 등으로 구성되어 있는 다이싱킹 방전기 SERVOⅢ를 사용하였다. 피삭재를 척에 고정하여 방전유에 함침시키며, 전극봉을 헤드부분의 공구홀더에 설치하여 전극봉을 유압제어식으로 상하 방향으로 이동시키면서, 전류와 듀티팩터 등의 가공조건들을 변화시키면서 가공성의 특성을 파악하였다. 방전/휴지시간 동안 전압의 변화를 측정하기 위하여 National Instruments사의 NI DAQ Board와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 데이터를 PC에 저장하여 분석하였다.

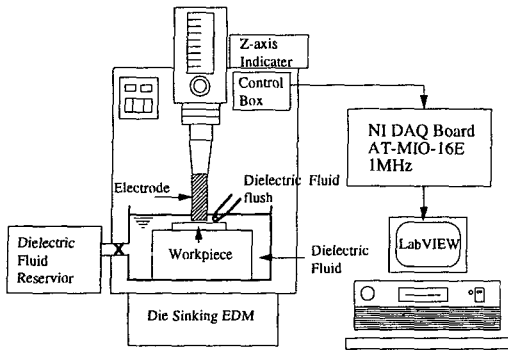
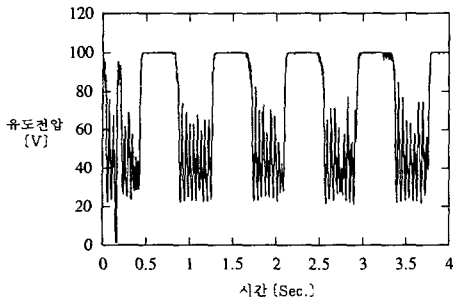
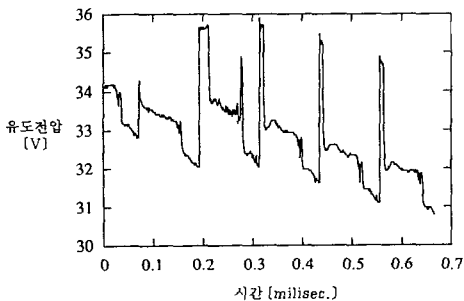


Fig. 3 Experimental set-up

방전가공은 칩의 유출을 돕기 위하여 헤드부가 Up/Down을 반복하며 Down시간 동안 방전이 진행되고, 헤드부가 Up되는 동안 칩의 유출을 돕는다. Fig. 4(a)는 Up/Down이 반복되고 있는 과정이고, Down시간중 일부부분은 Fig. 4(b)처럼 방전유도시간, 방전시간 및 휴지시간으로 이루어지고 있다. Fig. 4(b)에서 실제 방전에 행하여진 시간은 듀티팩터로 나타낼 수 있으며, 식(2)를 이용하여 각각의 경우에 대한 듀티팩터를 구하였다.



(a) Voltage change due to Up/Down



(b) Instant voltage change due to On/Off

Fig. 4 Wave forms of discharge voltage

방전가공을 실행한 후에 공작물의 무게를 10^{-4} g의 전자직시천칭을 이용하여 측정하여 실행전 상태와

비교하여, 방전가공 시간당 공작물제거량(MRR)을 파악하였다. 방전가공된 면은 표면거칠기 측정장치인 Sufstest-501을 사용하여 동일 조건으로 2회 반복 측정으로 중심선 평균거칠기(Ra) 및 최대거칠기(Rmax) 값을 측정하여 평균값으로 나타내었다.

실험에 사용된 피삭재 무게는 약6g로, 그 크기가 6x10x26mm이며 TiC/Al₂O₃인 세라믹 복합체를 사용하였다. 이 소재의 소결조건은 1750℃에서 1시간동안 Ar분위기에서 또한 열간정수압소결조건은 1600℃, 1500kg/cm²로 30분동안 Ar분위기에서 성형되었다. 이 소재의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 전극봉은 직경 20mm인 순도 99.9% 구리를 이용하여 5x12mm의 직사각형 모양으로 가공하여 실험에 사용하였고, 무게는 약100g 정도이며, 0.3mm의 깊이까지 동일한 간격으로 각각의 조건에 따라 방전가공을 실행하였다.

Table 1 Composition and properties of CMC

피삭재 : TiC(33%)/Al ₂ O ₃ (66%) Y ₂ O ₃ (1%)					
밀도 (kg/m ³)	열용량 (cal/kg · K)	열확산계수 (m ² /s)	경도 (Hv)	열전도도 (cal/m · s · K)	융점 (K)
4237.2	268.186	1.153×10^{-6}	2,050	1.31	2679

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 듀티팩터값을 구하기 위하여 구성 요소가 서로 다른 피삭재를 방전가공 조건들을 변화시키면서 또한 반복 실험을 통하여 데이터를 취득 분석하였다. 각 경우의 데이터는 유도시간, 방전시간, 휴지시간을 한 주기로 보통 3주기 이상이 포함될 수 있도록 하여 측정하고, 그리고 10회 반복 측정된 결과의 평균값으로 듀티팩터를 구하였으며, Table 2에서 나타내었다.

Table 2 Duty factor vs. different EDM conditions

No.	τ_w (ms)	τ_{on} (ms)	τ_{off} (ms)	DF
1	0.000	0.048	0.152	0.24
2	0.007	0.059	0.129	0.30
3	0.024	0.130	0.134	0.45

Fig. 5는 전극봉이 정극성과 역극성일 때 전류 및 듀티팩터의 방전조건들을 변화시켰을 경우 피삭재인 세라믹복합체의 가공상태를 육안으로 판별한 결과이다. 정극성 보다는 역극성이 표면이 더 양호하였으

거 전류가 낮을수록, 듀티팩터가 작을수록 파괴가 일어나지 않음을 알 수 있었다.

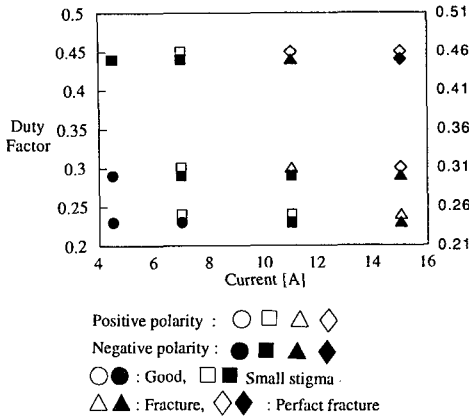


Fig. 5 EDMed surface state of CMC

Fig. 6은 전류의 변화에 따른 공작물제거량을 정극성과 역극성에 대하여 나타낸 것이며, 두 극성에 대하여 전류가 증가할수록 공작물제거량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 대체적으로 전극봉의 극성이 정극성보다 역극성일 경우 공작물제거량이 크게 나타났다.

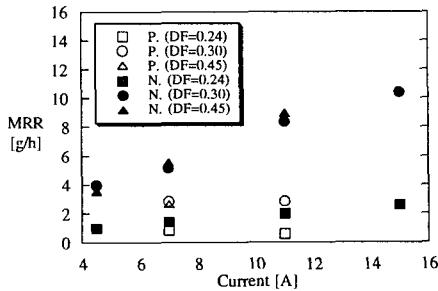


Fig. 6 MRR vs. current

Fig. 7은 듀티팩터의 변화에 따른 정극성과 역극성인 경우 공작물제거량을 나타낸 것이며, 두 경우에서 듀티팩터가 증가할수록 공작물제거량도 증가하고 있다.

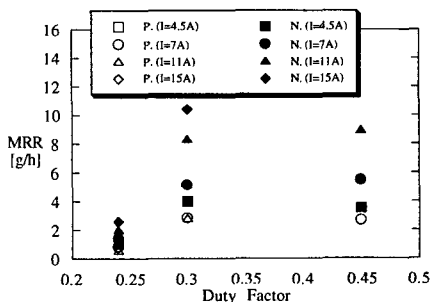


Fig. 7 MRR vs. duty factor

Fig. 8은 전류의 변화에 따른 최대표면거칠기를 나타내고 있으며, 정극성과 역극성 모두 전류가 높을수록 최대표면거칠기는 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 정극성 보다 역극성인 경우 최대거칠기 값이 양호한 것으로 나타났다.

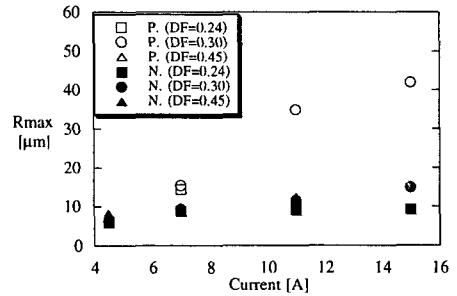


Fig. 8 Maximum surface roughness vs. current

Fig. 9는 양극성에서 듀티팩터에 따른 최대거칠기 값을 나타내고 있다. 양극성 모두 듀티팩터가 증가할수록 최대거칠기는 나빠지는 경향을 띠고 있으며, 정극성과 역극성의 최대거칠기 값을 비교해 볼 때 정극성보다 역극성의 최대거칠기 값이 양호한 것으로 나타나고 있다.

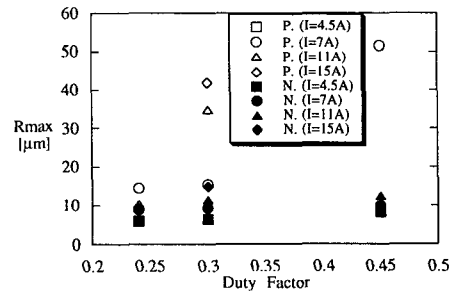
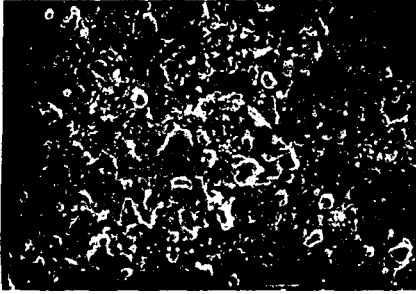
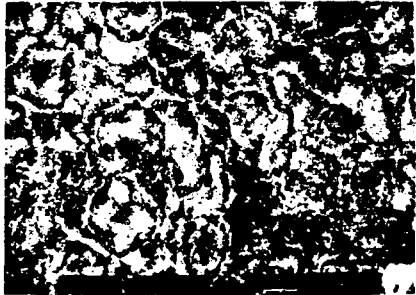


Fig. 9 Maximum surface roughness vs. DF

Fig. 10(a)는 정극성에서 미세조직변화를 관찰하기 위해 찍은 사진이다. 전자의 이동은 전극봉(음극)에서 피삭재(양극)로 이동하면서 양이온과 충돌이 생기고, 이러한 충돌에 의해서 불규칙한 상태로 충격력이 피삭재에 가하기 때문에 용융층이 균일하지 못하다. 그러나 Fig. 10(b)는 역극성에서 방전가공된 면으로 미세조직변화를 나타낸 것이며, 피삭재는 음극, 전극봉은 양극이기 때문에 Fig. 10(a)의 반대 현상이 나타나게 된다. 즉, 전극봉은 불균일하지만 피삭재의 단일 방전흔은 균일한 상태로 나타나며, 용융층의 크기는 100~150μm 정도이다.



(a) Positive polarity for current 7A(Mag. x200)



(b) Negative polarity for current 7A(Mag. x100)

Fig. 10 SEM photographs of EDMed surface

법으로 방전흔의 분석 등을 통하여 방전가공성의 특성에 대한 연구로 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 양극성 모두 전류와 듀티팩터가 증가함에 따라 공작물제거량도 증가 경향을 보였으며, 그중 정극성보다 역극성일 경우 공작물제거량이 많았다.
2. 최대표면거칠기는 양극성 모두 전류 및 듀티팩터가 증가할수록 나빠지는 경향을 보였고, 정극성보다 역극성일 경우 표면거칠기는 양호한 것으로 나타났다.
3. 방전가공된 면에서 정극성은 복잡한 형태를 이루고 있지만, 역극성은 균일한 형태가 나타나고, 방전흔의 크기는 100~150 μ m로 뚜렷이 나타났다.

Fig. 11은 열량 $Q=3.710 \times 10^7$ cal/m³인 경우 정상상태에서 유한요소법으로 구한 온도분포를 나타낸 그림이다.

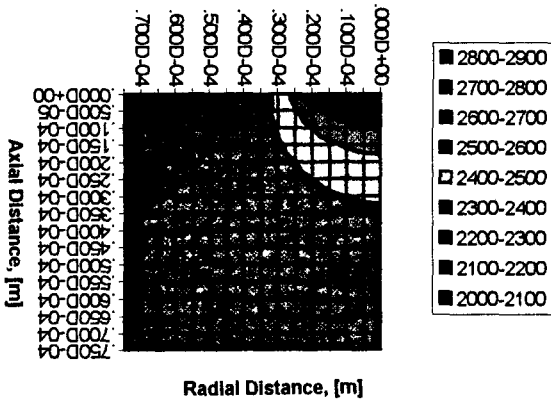


Fig. 11 Temperature distribution for one spark

5. 결 론

도전성 세라믹 복합체인 TiC/Al₂O₃를 형상 방전가공실험을 통하여 공작물제거량, 표면거칠기, 전자현미경을 통한 가공면의 미세조직변화 및 유한요소

참 고 문 헌

1. M. Ramulu, "EDM Sinker Cutting of Ceramic Particulate Composite SiC-TiB₂," *Advanced Ceramic Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 324-327, 1988.
2. N. Petrofes, A. Gadalla, "Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics," *Ceramic Bulletin*, Vol. 67, No. 6, pp. 1048-1052, 1988.
3. M. Ramulu, H. W. See, and D. H. Wang, "Machining of Ceramic Composite TiB₂/SiC by Spark Erosion," *Manufacturing Review* Vol. 3, No. 2, pp. 123-129, 1990.
4. M. Ramulu, M. Taya, "EDM machinability of SiC_w/Al composites", *Journal of Materials Science* Vol. 24, pp. 1103-1108, 1989.
5. N. Mohri, N. Saito and Y. Taunekawa, "Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 219-222, 1993.
6. P. Madhu, V. K. Jain, and T. Sundararajan, "Analysis of EDM Process:A Finite Element Approach," *ASME, Computers in Engineering*, Vol. Two, pp. 121-127, 1991.